

PUB-NO: DE004114407A1

DOCUMENT-  
IDENTIFIER: DE 4114407 A1

TITLE: Determining and fixing wavelength in air of light source - using control loop with many-valued characteristic with defined steps and evaluating thermodynamic parameters to eliminate ambiguity

PUBN-DATE: November 5, 1992

**INVENTOR-INFORMATION:**

NAME	COUNTRY
VRY, UWE DR	DE
DORSEL, ANDREAS DR	DE

**ASSIGNEE-INFORMATION:**

NAME	COUNTRY
ZEISS CARL FA	DE

APPL-NO: DE04114407

APPL-DATE: May 3, 1991

PRIORITY-DATA: DE04114407A (May 3, 1991)

INT-CL (IPC): G01J009/02 , G01N021/41 , H01S003/131

EUR-CL (EPC): G01J009/02 , H01S005/0687

**ABSTRACT:**

CHG DATE=19990617 STATUS=O>The method involves using a stabilising control loop (1,3,301,305,130) with a many-valued characteristic with defined steps (FSR). To eliminate the ambiguity of the many-valued characteristic, a coarse value of the wavelength in air is determined from thermodynamic parameters of the ambient air and if required, of parts of the control loop. A number of steps is determined from this coarse value by rounding and used to determine the exact wavelength in air. USE/ADVANTAGE - For Fabry-Perot interferometric length measurement. Method is simplified and calibration and operating method added.



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nlegungsschrift  
⑩ DE 41 14 407 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
G 01 J 9/02  
H 01 S 3/131  
G 01 N 21/41

②1 Aktenzeichen: P 41 14 407.4  
②2 Anmeldetag: 3. 5. 91  
④3 Offenlegungstag: 5. 11. 92

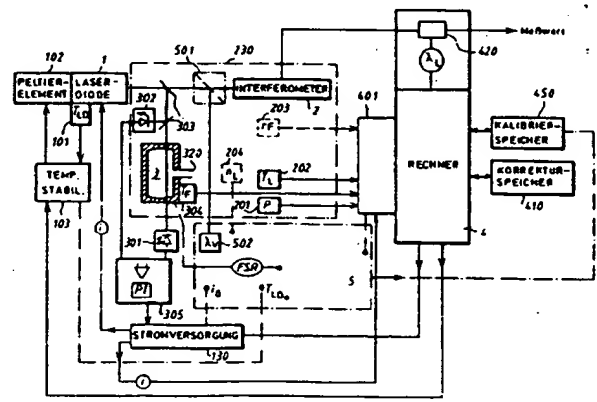
DE 41 14 407 A 1

⑦1 Anmelder:  
Fa. Carl Zeiss, 7920 Heidenheim, DE

⑦2 Erfinder:  
Vry, Uwe, Dr.; Dorsel, Andreas, Dr., 7080 Aalen, DE

⑤4 Verfahren und Anordnung zur Bestimmung und Fixierung der Luftwellenlänge einer Lichtquelle

⑤7 Verfahren und Anordnung zur Bestimmung und Fixierung der Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) einer Lichtquelle (1) - Laserdiode oder Nd-YAG-Ringlaser - mit einem Stabilisierungs-Regelkreis (1, luftgefülltes Fabry-Perot-Interferometer 3, 301, 305, 130), bei dem zur Beseitigung der Mehrdeutigkeit ein Grobwert der Luftwellenlänge aus thermodynamischen Parametern ( $T_L$ , p, rF) der Umgebungsluft (230) (Edlen-Formel) und bedarfsweise von Teilen (3,  $T_F$ ) des Regelkreises (1, 3, 301, 305, 130) bestimmt wird und durch Rundung auf das nächste ganzzahlige Vielfache des FSR die exakte Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) festgelegt wird.  
Anwendung für Längenmeßinterferometer. Kalibrierverfahren werden angegeben.



DE 41 14 407 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Luftwellenlänge einer Lichtquelle mit einem Stabilisierungs-Regelkreis, der eine Mehrdeutigkeit mit bestimmten Sprüngen aufweist. Ferner betrifft sie eine

5 Anordnung nach dem Oberbegriff des Anspruchs 2.

Interferometrische Längenmessungen in Luft sind sehr genau, wenn die Laserwellenlänge in Luft genau bekannt ist.

Dazu ist die Laserwellenlänge in Luft zu stabilisieren, was durch Frequenzänderung (bzw. Änderung der Vakuumwellenlänge) des Lasers möglich ist.

10 Luftgefüllte Fabry-Perot-Interferometer sind geeignete Mittel dazu. Es gibt dabei jedoch sehr viele Transmissionsmaxima, d. h. eine Mehrdeutigkeit der Stabilisierung. Es ist daher erforderlich, das Transmissionsmaximum, auf das stabilisiert wird, zu kennen.

Die Änderungen von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit unter gewöhnlichen Umgebungsbedingungen bedingen Brechzahländerungen der Luft und damit nötige Frequenzverschiebungen zur Einhaltung einer festen

15 Luftwellenlänge, die größer sind als der Durchstimmbereich typischer Laserdioden und Festkörperlaser, z. B. Nd-YAG-Laser.

Dem kann begegnet werden durch Springen zu verschiedenen Transmissionsmaxima des Fabry-Perot-Interferometers je nach Umgebungsbedingungen. Das gerade benutzte Transmissionsmaximum und damit die Wellenlänge muß jedoch bekannt sein.

20 Während eines Meßlaufs kann dies durch Zählen der Sprünge geschehen. Beim Einschalten ist dies jedoch ein Problem.

Bekannte Lösungen — M. Kerner, *Feinwerktechnik + Meßtechnik* 87 (1979), 8 (Fig. 10), EP-OS 00 94 709, DE-OS 39 11 472 verwenden zur Überwindung der Mehrdeutigkeit ein zweites Fabry-Perot-Interferometer

25 anderer Finesse. Auch WO 90/11 492 sieht dazu ein gesondertes Wellenlängenmeßsystem vor.

Aus der nicht vorveröffentlichten Patentanmeldung DE P 40 39 371.2 des gleichen Anmelders sind Probleme und Lösungen der Stabilisierung der Vakuumwellenlänge mit evakuierten Fabry-Perot-Interferometern bekannt.

Es ist die Aufgabe der Erfindung, gattungsgemäße Verfahren und Anordnungen zu vereinfachen und Kalibrier- und Betriebsverfahren dazu anzugeben.

30 Die Verfahrenslösung gelingt mit den Merkmalen des Anspruchs 1, wonach zur Beseitigung der Mehrdeutigkeit ein Grobwert der Luftwellenlänge aus thermodynamischen Parametern ( $T_L$ ,  $p$ ,  $r_F$ ) der Umgebungsluft und bedarfsweise von Teilen des Regelkreises bestimmt wird, aus diesem Grobwert durch Rundung eine Zahl ( $N$ ) von Sprüngen (FSR) bestimmt wird und mit dieser Zahl ( $N$ ) von Sprüngen (FSR) die exakte Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) festgelegt wird.

35 Eine geeignete Anordnung wird mit dem Kennzeichen des Anspruchs 2 erhalten. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche 3 bis 7.

Ein zugehöriges Kalibrierverfahren ist Gegenstand des Anspruchs 8, wonach zusätzlich Geber und Speicher für die Körpertemperatur des Fabry-Perot-Interferometers und/oder für die Temperatur des Lasers und/oder für die Luftfeuchtigkeit im Volumen des Interferometers vorgesehen sind und im Rechner zur Berechnung des

40 Näherungswerts der Luftwellenlänge herangezogen werden.

Verfahren zum Einschalten zum Normalbetrieb sind Gegenstand der Ansprüche 9 bis 12. Verfahren zum Betrieb sind Gegenstand der Ansprüche 13 bis 14.

Näher erläutert wird die Erfindung mit Hilfe der Zeichnung.

Fig. 1 zeigt in schematischer Übersicht eine Fabry-Perot-stabilisierte Laserlichtquelle an einem Interferometer.

45 Die Hauptelemente der Anordnung nach Fig. 1 sind die Laserdiode (1), das von dieser beleuchtete Interferometer (2), das Fabry-Perot-Interferometer (3) zur Wellenlängenstabilisierung, der Rechner (4) und die nur einmalig oder nach größeren Nutzungsintervallen benötigte Kalibriereinrichtung (5).

Die Laserdiode (1) ist mit einem Temperaturfühler (101) und einem Peltierelement (102) ausgestattet, mit denen eine Regelung (103) die Laserdiodentemperatur konstant hält. Den Betriebsstrom ( $i$ ) liefert eine Stromversorgung (130).

Ein Teil des Lichtstrahls von der Laserdiode (1) zum Interferometer (2) wird durch Spiegel (303) ausgekoppelt und durch das Fabry-Perot-Interferometer (3) auf eine Fotodiode (301) bzw. auf die Referenzdiode (302) gerichtet. Die Ausgänge der Fotodioden (301) und (302) sind mit einem PI-Regler (305) verbunden, der auf die

55 Stromversorgung (130) der Laserdiode (1) wirkt.

In bekannter Weise wird so die Stabilisierung der Wellenlänge ( $\lambda_L$ ) im Luftraum (230) des Interferometers (2) erreicht, wozu eine Öffnung (320) im Gehäuse des Fabry-Perot-Interferometers (3) und dessen Anordnung im Luftraum (230) des Interferometers (2) sicherstellt, daß die Luft im Fabry-Perot-Interferometer (3) und im Interferometer (2) im thermodynamischen Gleichgewicht steht und gleichen Brechungsindex hat.

60 Damit ist aber die absolute Größe der Wellenlänge ( $\lambda_L$ ) noch nicht bekannt und der Regelbereich für die Frequenz ist zu eng, um die gewöhnlichen Schwankungen des Brechungsindex im Luftvolumen (230) des Interferometers (2) bei Laborbedingungen kompensieren zu können.

Erfindungsgemäß werden daher im Luftvolumen (230) des Interferometers (2) Sensoren für den Luftdruck  $p$  (201), die Lufttemperatur  $T_L$  (202) und optional für die relative Luftfeuchtigkeit  $r_F$  (203) angeordnet. Wegen der thermischen Trägheit des Gehäuses kann ein weiterer Sensor für die Temperatur  $T_F$  (304) des Fabry-Perot-Interferometers (3) an diesem angebracht werden.

Die Meßwerte der Sensoren (201, 202, 203, 304) und die Größe des Laserdiodenstroms  $i$  der Stromversorgung (130) werden auf die Eingänge (401) des Rechners (4) geführt.

Nur zur ersten Inbetriebnahme und bei Bedarf zur Neukalibrierung nach längerer Betriebsdauer oder nach Änderungen des Aufbaus wird die Kalibriereinrichtung (5) mit der Laserlichtquelle verbunden.

Mit einem Teilerspiegler (501) wird ein Teil des Laserlichts auf einen Vakuumwellenlängendetektor (502) geleitet, der z. B. ein Wavemeter, das die Wellenlänge mit einer kalibrierten Referenz vergleicht, sein kann. In das Luftvolumen (230) des Interferometers (2) wird ein Detektor (204) für die Brechzahl  $n_L$  eingebracht, insbesondere ein Refraktometer.

Alternativ kann auch in ein zur Längenmessung ausgelegtes Interferometer (2) ein Längennormal eingebracht werden und aus dem Meßwert kann der Absolutwert der Luftwellenlänge  $\lambda_L$  bestimmt werden.

Weiter wird in bekannter Weise der freie Spektralbereich FSR des Fabry-Perot-Interferometers (3) bestimmt. Der Regelkreis (1, 3, 305, 130) zur Luftwellenlängenstabilisierung wird eingebracht und die Startwerte  $i_0$  des Laserdiodenstroms und  $T_{L,0}$  der Laserdiodentemperatur werden von der Kalibriereinrichtung (5) erfaßt, ebenso wie die Startwerte der Sensoren (201, 202, 203) im Luftvolumen (230) und des Temperatursensors (304) am Fabry-Perot-Interferometer (3), z. B. über die Eingänge (401).

Alle von der Kalibriereinrichtung (5) erfaßten Werte werden in einem Kalibrierspeicher (450) gespeichert. Die Meßwerte können aber auch zuerst im Rechner (4) ausgewertet werden und dann im Kalibrierspeicher (450) abgelegt werden.

Der Rechner (4) gibt beim Start der Anordnung Startwerte an die Temperaturstabilisierung (103) für die Temperatur  $T_{LD}$  der Laserdiode (1) und an die Stromversorgung (130) für den Strom  $i$  der Laserdiode (1).

Er (4) verknüpft außerdem in einem Modul (420) die Roh-Meßwerte  $m/\lambda_L$  des Interferometers (2) mit dem bestimmten Wert der Luftwellenlänge  $\lambda_L$  zu dem kalibrierten genauen Meßwert  $m$ , der in beliebiger üblicher Weise angegeben wird. Das Interferometer (2) kann insbesondere zur Längenmessung ausgelegt sein, so daß die Meßwerte ( $m$ ) Längen sind.

Durch Alterung verändern sich verschiedene Parameter der Anordnung, insbesondere die Strom/Wellenlängen-Kennlinie  $\lambda(i)$  der Laserdiode (1), so daß zu einer bestimmten Luftwellenlänge  $\lambda_L$  im Lauf der Zeit veränderte Regelparameter gehören. Dem entsprechend wird in zeitlichen Intervallen ein Korrekturwert  $\lambda_A$  gebildet und in dem Korrekturspeicher (410) abgelegt. Bei einem Neustart der Anordnung wird dieser Korrekturwert  $\lambda_A$  jeweils in die Bildung der Startwerte einbezogen.

Beispielsweise wird eine handelsübliche Laserdiode (1) bei einer Vakuumwellenlänge  $\lambda_v$  von ca. 785 nm mit einem Strom  $i$  der Größenordnung 60 mA betrieben.

Der freie Spektralbereich FSR des Fabry-Perot-Interferometers (3) ist ca.  $10^{-5} \cdot \lambda_L$  (Luftwellenlänge). Die Stromdifferenz  $i_{FSR}$ , die zum Durchfahren eines freien Spektralbereiches FSR nötig ist, beträgt ca. 1 mA.

Als Regelparameter dient der Strom durch die Laserdiode (1). Bei der Inbetriebnahme der Laserdiode (1) wählt man einen Arbeitsbereich im Kennlinienfeld der Wellenlänge, der bei einer festen Temperatur liegt und einen Strombereich der Größe von etwas mehr als  $i_{FSR}$  umfaßt. Dieser Arbeitsbereich sollte möglichst weit von Modensprüngen entfernt sein.

Das Einlocken des Regelkreises (1, 3, 301, 305, 130) geschieht so, daß ein Lock innerhalb eines bestimmten vorgegebenen Strombereiches gesucht wird. Dieser Bereich muß mindestens etwas größer als  $i_{FSR}$  sein.

Zur Bestimmung der aktuellen Luftwellenlänge: Ist  $i$  der Strom, bei dem der Lock erfolgt, so ist die Vakuumwellenlänge der Laserdiode (1)

$$\lambda_v = \lambda_{v,0} + \frac{d\lambda_v}{di} (i - i_0) + \frac{d\lambda_v}{dT_L} (T_L - T_{L,0}) \quad (\text{Gl. 1})$$

und die Luftwellenlänge beträgt

$$\lambda_L = \lambda_v / n \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Koeffizienten  $d\lambda_v/di$  und  $d\lambda_v/dT_L$  (typische Werte:  $6 \cdot 10^{-3}$  nm/A und  $10^{-3}$  nm/K) wurden bei der Vermessung der Laserdiode (1) bzw. bei der Kalibrierung bestimmt. Der Brechungsindex  $n$  wird mit der Edlén-Formel näherungsweise berechnet, indem Meßwerte von  $T_L$ ,  $p$  und evtl.  $rF$  eingesetzt werden. Die so berechnete Luftwellenlänge  $\lambda_L$  muß eine Transmissionswellenlänge des Fabry-Perot-Interferometers (3) sein. Diese Transmissionswellenlängen sind gegeben durch

$$\lambda_L = \lambda_{L,0} + \frac{d\lambda_L}{dp} (p - p_0) + \frac{d\lambda_L}{dT_F} (T_F - T_{F,0}) + N \cdot \text{FSR} \quad (\text{Gl. 3})$$

Der Koeffizient  $d\lambda_L/dp$  beschreibt die Kompression des Fabry-Perot-Interferometers (3) auf Grund des Luftdrucks und kann aus dem E-Modul berechnet werden (Größenordnung:  $d\lambda_L/dp = 10^{-9}$  nm/hPa);  $d\lambda_L/dT_F$  berücksichtigt die Wärmeausdehnung des Fabry-Perot-Interferometers (3) (Größenordnung für diesen Wert:  $2,5 \cdot 10^{-7}$  nm/K und kleiner nach Spezifikation von Zerodur.  $N$  muß eine ganze Zahl sein. Sie wird aus Gleichsetzen von Gleichung (Gl. 2) und (Gl. 3) und durch gewöhnliche Rundung gewonnen. Im Idealfall ist die Rundung nicht nötig; in der Praxis fließen jedoch vor allem die Alterung der Laserdiode (1) und Meßgenauigkeiten beim Brechungsindex der Luft ein. Für die endgültige Angabe des Wertes der Luftwellenlänge wird die Gleichung (3) mit dem richtigen ganzzahligen  $N$  herangezogen.

Zur Abschätzung der nötigen Meßgenauigkeit der einzelnen Parameter: Die Größenordnungen der Brechkoeffizienten sind

$$\begin{aligned} dn/dT_L &= -10^{-6}/K; \\ dn/dp &= 3 \cdot 10^{-7}/hPa; \\ dn/drF &= -10^{-8}/\%rF. \end{aligned}$$

Weiterhin ist zu beachten, daß die Brechzahl durch Fremdgase unter schlechten Bedingungen, z. B. in Fertigungsräumen, um größenordnungsmäßig  $1 - 2 \cdot 10^{-6}$  erhöht werden kann. Da der Abstand der Transmissionsmaxima des Fabry-Perot-Interferometers (3) einer Brechzahldifferenz von  $10^{-5}$  entspricht, werden somit keine hochpräzisen Temperatur- (202, 304) und Drucksensoren (201) benötigt. Auf die Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit rF (203) kann in aller Regel sogar ganz verzichtet werden.

Damit werden typischerweise folgende Umweltsensoren benötigt:

- Druckmesser (201) mit einer Genauigkeit von ca. 1 hPa;
- Luft-Thermometer (202) mit einer Genauigkeit von etwas weniger als einem Grad;
- Material-Thermometer (304) mit einer Genauigkeit, die von der thermischen Ausdehnung des Fabry-Perot-Interferometers abhängt und bei Konstruktion aus Zerodur bei etwa einem Grad liegen sollte.

Solche Sensoren (201, 202, 304) sind handelsüblich, preiswert und zuverlässig. Die Einsparung gegenüber der Anordnung eines kompletten zweiten Fabry-Perot-Interferometers, wie im oben genannten Stand der Technik, ist also beträchtlich.

Wandert im Laufe der Zeit der Strom durch die Laserdiode (1) aus dem vorgegebenen Regelbereich heraus (z. B. durch Veränderung des Brechungsindex der Luft), so kann er durch Änderung um ganzzahlige Vielfache von iFSR und neues Einlocken wieder in diesen hinein gebracht werden. In einem solchen Fall kann N entweder vollkommen neu bestimmt werden oder die Änderung von N aus der vorgenommenen Stromänderung ermittelt werden.

Zur Berücksichtigung der Alterung der Laserdiode (1): Sie äußert sich in einem Offset  $\lambda_A$  der Vakuumwellenlänge, so daß aus Gl. (1) wird:

$$\lambda_{v,A} = \lambda_{v,0} + \frac{d\lambda_v}{di} (i - i_0) + \frac{d\lambda_v}{dT_L} (T_L - T_{L,0}) + \lambda_A = \lambda_v + \lambda_A \quad (\text{Gl. 4})$$

Aus der laufenden Stabilisierung heraus kann  $\lambda_{v,A}$  mit (Gl. 3) und (Gl. 2) bestimmt werden;  $\lambda_v$  enthält man aus (Gl. 1). Somit kann z. B. vor dem Abschalten  $\lambda_A$  bestimmt, im Korrekturspeicher (410) abgelegt und dieser Wert beim nächsten Einschalten verwendet werden. Bei der Bestimmung von N und  $\lambda_L$  wird dann (Gl. 4) anstelle von (Gl. 1) verwendet.

In dem beschriebenen Beispiel wird als Laser (1) eine Laserdiode (1) verwendet. Eine weitere vorteilhafte Alternative ist die Verwendung eines Nd-YAG-Ringlasers. Diese Bauart ist durch Veränderung der Temperatursteuerspannung rund um  $\lambda = 1064$  nm verstimmbar. Der Regelbereich ist durch Modensprünge begrenzt und etwa dreimal so groß wie der freie Spektralbereich des oben genannten Fabry-Perot-Interferometers (3).

Für den Regelkreis geeignete Fabry-Perot-Interferometer (3) sind im oben genannten Stand der Technik beschrieben. Vorteilhaft ist ein konfokaler Aufbau mit Zerodur-Glaskeramik-Tragkörper und ausreichend grober Bohrung für freien Luftaustausch.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung und Fixierung der Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) einer Lichtquelle (1) mit einem Stabilisierungs-Regelkreis (1, 3, 301, 305, 130), der eine Mehrdeutigkeit mit bestimmten Sprüngen (FSR) aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß zur Beseitigung der Mehrdeutigkeit ein Grobwert der Luftwellenlänge aus thermodynamischen Parametern ( $T_L$ , p, rF) der Umgebungsluft (230) und bedarfsweise von Teilen (3) des Regelkreises (1, 3, 301, 305, 130) bestimmt wird, aus diesem Grobwert durch Rundung eine Zahl (N) von Sprüngen (FSR) bestimmt wird und mit dieser Zahl (N) von Sprüngen (FSR) die exakte Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) festgelegt wird.

2. Fabry-Perot-stabilisierte Laserlichtquelle für Interferometer (2) mit:

- Laser (1) mit mittels mindestens eines Regelparameters (i) über einen Frequenzbereich durchstimmbarer Frequenz
- Fabry-Perot-Interferometer (3) mit Luftfüllung (320) im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem Volumen (230) des Interferometers (2) und mit einem freien Spektralbereich (FSR) der kleiner als der Regelbereich des Lasers (1) ist und mit einem Fotodetektor (301) an seinem Ausgang
- Regelkreis, der mittels des Fotodetektors (301) und der Regelparameter (i) des Lasers (1) die Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) des Lasers (1) auf eine Stelle eines Transmissionsmaximums (N) des Fabry-Perot-Interferometers (3) fixiert und bei Erreichen der Grenzen des Frequenzbereiches einen Sprung über den freien Spektralbereich (FSR) des Fabry-Perot-Interferometers (3) zu einem benachbarten Transmissionsmaximum ( $N+1$ ,  $N-1$ ) ausführt
- Geber und Speicher (450) für Luftdruck (201) und Temperatur (202) im Volumen (230) des Interferometers (2), für den oder die Regelparameter (i) und für die Summe der Sprünge zwischen Transmissionsmaxima (N)
- Rechner (4) zur
- Berechnung eines Näherungswertes der Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) aus der Vakuumwellenlänge ( $\lambda_v$ ).

- bestimmt durch die Regelparameter (i), und aus dem Brechungsindex, bestimmt nach der Edlen-Parametermethode aus den Werten von Luftdruck (p) und -temperatur ( $T_L$ ),
- Bestimmung der Ordnung des dem Näherungswert nächstliegenden Transmissionsmaximums (N),
  - Bestimmung der genauen Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) aus der Ordnung des nächstliegenden Transmissionsmaximums (N) und dem bekannten Modenabstand des Fabry-Perot-Interferometers (3).
3. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Laser (1) eine Laserdiode eingesetzt ist mit den Regelparametern Diodenstrom (i) und Diodentemperatur ( $T_L$ ).
4. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Laser (1) ein Nd-YAG-Ringlaser eingesetzt ist mit dem Regelparameter Temperatursteuerspannung.
5. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Fabry-Perot-Interferometer (3) konfokal aufgebaut ist.
6. Laserlichtquelle nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Diodentemperatur (101) festgehalten wird und der Regelkreis (1, 3, 301, 305, 130) den Diodenstrom (i) als Regelparameter nutzt.
7. Laserlichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich Geber und Speicher für die Körpertemperatur (304,  $T_F$ ) des Fabry-Perot-Interferometers (3) und/oder für die Temperatur (101,  $T_{LD}$ ) des Lasers (1) und/oder für die Luftfeuchtigkeit (203, rF) im Volumen (230) des Interferometers (2) vorgesehen sind und im Rechner (4) zur Berechnung des Näherungswerts der Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) herangezogen werden.
8. Verfahren zur Kalibrierung einer Laserlichtquelle nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß im stabilisierten Betrieb zusätzlich gemessen werden
- zwei der Größen Frequenz des Lasers (1), Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) der Laserlichtquelle, Brechungsindex ( $n_L$ ) der Luft im Interferometervolumen (230)
  - der freie Spektralbereich (FSR) des Fabry-Perot-Interferometers (3)
  - damit im Rechner (4) eine Funktion bestimmt und gespeichert wird zur Berechnung der Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ).
9. Verfahren zum Einschalten nach vorherigem Ausschalten einer Laserlichtquelle nach mindestens einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß ein zum Ausschaltzeitpunkt gespeicherter Wert ( $\lambda_a$ ) für die alterungsbedingte Verschiebung der Frequenz des Lasers (1) bei gleichen Regelparametern (i) in die Berechnung des Näherungswerts der Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) einbezogen wird.
10. Verfahren zur Kalibrierung einer Laserlichtquelle nach Anspruch 8 für ein Längenmeßinterferometer (2), dadurch gekennzeichnet, daß die Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) mittels eines Längennormalis im Längenmeßinterferometer (2) bestimmt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Brechungsindex der Luft nach der Edlen-Formel aus Luftdruck (p), Temperatur ( $T_L$ ) und Luftfeuchtigkeit (rF) im Interferometervolumen (230) bestimmt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Brechungsindex der Luft mit einem Refraktometer gemessen wird.
13. Verfahren zum Betrieb einer Fabry-Perot-stabilisierten Lichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der genauen Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) im Rechner (4) in festen zeitlichen Intervallen wiederholt wird.
14. Verfahren zum Betrieb einer Fabry-Perot-stabilisierten Lichtquelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der genauen Luftwellenlänge ( $\lambda_L$ ) im Rechner (4) bei vorbestimmten Änderungen der Signale der Geber (201 – 204, i, 304) wiederholt wird.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen



METHOD AND ARRANGEMENT FOR DETERMINING AND FIXING THE ATMOSPHERIC  
WAVELENGTH OF A LIGHT SOURCE

Dr. Uwe Vry and Dr. Andreas Dorsel

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE  
WASHINGTON, D.C. OCTOBER 2002  
TRANSLATED BY THE RALPH MCELROY TRANSLATION COMPANY



FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY  
GERMAN PATENT OFFICE  
PATENT NO. 41 14 407 A1  
(Offenlegungsschrift)

Int. Cl. <sup>5</sup> :	G 01 J	9/02
	H 01 S	3/131
	G 01 N	21/41

Filing No.: P 41 14 407.4

Filing Date: May 3, 1991

Date Laid-open to Public Inspection: November 5, 1992

METHOD AND ARRANGEMENT FOR DETERMINING AND FIXING THE  
ATMOSPHERIC WAVELENGTH OF A LIGHT SOURCE

[Verfahren und Anordnung zur Bestimmung und Fixierung der Luftwellenlänge einer  
Lichtquelle]

Inventor: Dr. Uwe Vry  
Dr. Andreas Dorsel

Applicant: Fa. Carl Zeiss

Description

The invention pertains to a method for determining the atmospheric wavelength of a light source with a stabilizing control circuit that has an ambiguity with certain sudden changes. The invention also pertains to an arrangement according to the preamble of Claim 2.

Interferometric length measurements in the air are very accurate if the atmospheric wavelength of the laser is exactly known.

For this purpose, the atmospheric wavelength of the laser needs to be stabilized by changing the frequency (or changing the vacuum wavelength) of the laser.

Air-filled Fabry-Perot interferometers are suitable means for this purpose. However, a very large quantity of transmission maximums, i.e., an ambiguity of the stabilization, occurs in this case. Consequently, it is necessary to know the transmission maximum to which the stabilization is carried out.

Changes in the pressure, temperature and relative humidity under normal ambient conditions cause changes in the refractive index of the air and consequently require frequency shifts for observing a fixed atmospheric wavelength, wherein said frequency shifts are greater than the tuning range of typical laser diodes and solid-state lasers, e.g., Nd-YAG lasers.

This can be counteracted by changing to different transmission maximums of the Fabry-Perot interferometer depending on the ambient conditions. However, the instantaneously used transmission maximum and consequently the wavelength need to be known.

During a measuring cycle, this can be realized by counting the sudden changes. However, this represents a problem when the arrangement is switched on.

Known solutions--M. Kerner, *Feinwerktechnik + Messtechnik* 87 (1979), 8 (Fig. 10); EP-OS 0 094 709; DE-OS 39 11 472--utilize a second Fabry-Perot interferometer of different design in order to overcome the ambiguity. A special wavelength measuring system for this purpose is also proposed in WO 90/11492.

Problems and solutions with respect to the stabilization of the vacuum wavelength by means of evacuated Fabry-Perot interferometers are discussed in the earlier prepublished patent application DE P 40 39 371.2 by the same applicant.

The invention is based on the objective of simplifying methods and arrangements of the initially described type and of disclosing corresponding calibrating and operating methods.

The objective of the invention with respect to the method is attained with the characteristics of Claim 1, according to which a rough value of the atmospheric wavelength is determined from thermodynamic parameters ( $T_L$ ,  $p$ ,  $rF$ ) of the ambient air and, if so required, of parts of the control circuit in order to eliminate the ambiguity, wherein a number ( $N$ ) of sudden changes (FSR) is determined from this rough value by means of rounding and the exact atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) is determined with this number ( $N$ ) of sudden changes (FSR).

A suitable arrangement is disclosed in the characterizing portion of Claim 2. Advantageous embodiments thereof are disclosed in dependent Claims 3-7.

A corresponding calibrating method forms the object of Claim 8, wherein additional sensors and memories for the body temperature of the Fabry-Perot interferometer and/or for the temperature of the laser and/or for the relative humidity in the volume of the interferometer are provided and used in the computer for calculating the approximate value of the atmospheric wavelength.

Methods for switching on the arrangement for the normal operation form the objects of Claims 9-12. Operating methods form the objects of Claims 13-14.

The invention is described in greater detail below with reference to the figure.

Figure 1 shows a schematic representation of a Fabry-Perot-stabilized laser light source on an interferometer.

The principal elements of the arrangement shown in Figure 1 are the laser diode (1), the interferometer (2) illuminated by said laser diode, the Fabry-Perot interferometer (3) for stabilizing the wavelength, the computer (4) and the calibrating device (5) that is only needed once or after longer intervals of use.

The laser diode (1) is equipped with a temperature sensor (101) and a Peltier element (102), by means of which a control (103) maintains the laser diode temperature constant. The operating current ( $i$ ) is delivered by a power supply (130).

A part of the light beam emitted from the laser diode (1) to the interferometer (2) is decoupled with the aid of a mirror (303) and directed onto a photodiode (301) and onto the reference diode (302) by the Fabry-Perot interferometer (3). The outputs of the photodiodes (301) and (302) are connected to a PI controller (305) that acts upon the power supply (130) of the laser diode (1).

The stabilization of the wavelength ( $\lambda_L$ ) in the air volume (230) of the interferometer (2) is conventionally achieved in this fashion. In this case, an opening (320) in the housing of the Fabry-Perot interferometer (3), as well as its arrangement in the atmosphere (230) of the interferometer (2), ensure that the air in the Fabry-Perot interferometer (3) and in the interferometer (2) are in thermodynamic equilibrium and have the same refractive index.

However, the absolute value of the wavelength ( $\lambda_L$ ) is not yet known, and the control range for the frequency is not sufficiently broad for compensating customary fluctuations of the refractive index in the air volume (230) of the interferometer (2) under laboratory conditions.

According to the invention, sensors for the atmospheric pressure  $p$  (201), the air temperature  $T_L$  (202) and, optionally, for the relative humidity  $rF$  (203) are arranged in the air volume (230) of the interferometer (2). Due to the thermal inertia of the housing, another sensor for the temperature  $T_F$  (304) of the Fabry-Perot interferometer (3) can be arranged on said housing.

The measuring values of the sensors (201, 202, 203, 304) and the value of the laser diode current  $i$  of the power supply (130) are fed to the inputs (401) of the computer (4).

The calibrating device (5) is only connected to the laser light source during the initial operation, if a recalibration is required after an extended operating time or after the structural design is changed.

A part of the laser light is directed onto a vacuum wavelength detector (502) with the aid of a dividing mirror (501), wherein the vacuum wavelength detector may, for example, consist of a wavemeter that compares the wavelength with a calibrated reference. A detector (204) for the refractive index  $n_L$ , in particular, a refractometer, is arranged in the air volume (230) of the interferometer (2).

Alternatively, a length standard may be put in place in an interferometer (2) designed for length measurements, and the absolute value of the atmospheric wavelength  $\lambda_L$  can be determined from the measuring value.

In addition, the free spectral range FSR of the Fabry-Perot interferometer (3) is conventionally determined. The control circuit (1, 3, 305, 130) for stabilizing the atmospheric wavelength is put in place, and the starting values  $i_0$  of the laser diode current and  $T_{LD0}$  of the laser diode temperature are detected by the calibrating device (5), namely analogous to the starting values of the sensors (201, 202, 203) in the air volume (230) and of the temperature sensor (304) on the Fabry-Perot interferometer (3), e.g., via the inputs (401).

All values detected by the calibrating device (5) are stored in a calibrating memory (450). However, the measuring values may also be evaluated in the computer (4) first and then stored in the calibrating memory (450).

When the arrangement is started, the computer (4) delivers starting values to the temperature stabilization (103) for the temperature  $T_{LD}$  of the laser diode (1) and to the power supply (130) for the current  $i$  of the laser diode (1).

In addition, the computer (4) logically combines the unprocessed measuring values  $m/\lambda_L$  of the interferometer (2) with the certain value of the atmospheric wavelength  $\lambda_L$  in a module (420), namely into the calibrated, exact measuring value that is conventionally set in an arbitrary fashion. The interferometer (2) may, in particular, be designed for length measurements such that the measuring values ( $m$ ) represent lengths.

Different parameters of the arrangement, in particular, the current/wavelength characteristic  $\lambda(i)$  of the laser diode (1), change due to aging such that a certain atmospheric wavelength  $\lambda_L$  has control parameters that change over time. This is the reason why a correction value  $\lambda_A$  is formed in certain time intervals and stored in the correction memory (410). When the arrangement is restarted, this correction value  $\lambda_A$  is respectively incorporated into the formation of the starting values.

For example, a conventional laser diode (1) is operated at a vacuum wavelength  $\lambda_v$  of approximately 785 nm with a current  $i$  on the order of 60 mA.

The free spectral range FSR of the Fabry-Perot interferometer (3) is approximately  $10^{-5} \times \lambda_L$  (atmospheric wavelength). The current difference  $i_{FSR}$  required for scanning a free spectral range FSR is approximately 1 mA.

The current through the laser diode (1) serves as the control parameter. When starting the laser diode (1), one selects an operating range in the characteristic field of the wavelength which lies at a fixed temperature and comprises a current range on the order of slightly more than  $i_{FSR}$ . This operating range should lie as far apart from sudden mode changes as possible.

The locking of the control circuit (1, 3, 301, 305, 130) is realized by searching for a lock within a certain predetermined current range. This range needs to be at least slightly larger than  $i_{FSR}$ .

The following applies when determining the current atmospheric wavelength: if  $i$  is the current at which the lock takes place, the vacuum wavelength of the laser diode (1) is

$$\lambda_v = \lambda_{v,0} + \frac{d\lambda_v}{di}(i - i_0) + \frac{d\lambda_v}{dT_L}(T_L - T_{L,0}) \quad (Gl. 1)$$

and the atmospheric wavelength is

$$\lambda_L = \lambda_v/n \quad (Gl. 2)$$

The coefficients  $d\lambda_v/di$  and  $d\lambda_v/dT_L$  (typical values:  $6 \times 10^{-3}$  nm/A and  $10^{-3}$  nm/K) were determined during the measurement of the laser diode (1) or the calibration, respectively. The refractive index  $n$  is approximately calculated with the Edlen formula by utilizing a measuring values of  $T_L$ ,  $p$  and, if applicable,  $rF$ . The thusly calculated atmospheric wavelength  $\lambda_L$  needs to be a transmission wavelength of the Fabry-Perot interferometer (3). These transmission wavelengths are defined by

$$\lambda_L = \lambda_{L,0} + \frac{d\lambda_L}{dp}(p - p_0) + \frac{d\lambda_L}{dT_F}(T_F - T_{F,0}) + N \cdot FSR \quad (Gl. 3)$$

The coefficient  $d\lambda_L/dp$  describes the compression of the Fabry-Perot interferometer (3) due to the atmospheric pressure and can be calculated from the E module (and lies on the order of  $d\lambda_L/dp = 10^{-9}$  /hPa);  $d\lambda_L/dT_F$  takes into consideration the thermal expansion of the Fabry-Perot interferometer (3) (and lies on the order of  $2.5 \times 10^{-7}$   $\lambda$ /K and less according to the Zerodur specification).  $N$  needs to be an integral number and is obtained by equating equation (2) and equation (3) and by conventional rounding. In ideal instances, rounding is not necessary; however, the aging of the laser diode (1) and measuring accuracies in the refractive index of air need to be taken into account in practical applications. For the final determination of the value of the atmospheric wavelength, equation (3) with the correct integral  $N$  is used.

The following applies with respect to estimating the required measuring accuracy of the individual parameters: the refractive indexes lie on the order of

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dT_L} &= -10^{-6}/K; \\ \frac{dn}{dp} &= 3 \cdot 10^{-7}/hPa; \\ \frac{dn}{drF} &= -10^{-8}/\%rF. \end{aligned}$$

In addition, it needs to be observed that the refractive index may be increased on the order of  $1-2 \times 10^{-6}$  by foreign gases under inferior conditions, e.g., in manufacturing rooms. Since the spacing between the transmission maximums of the Fabry-Perot interferometer (3) corresponds to a differential refractive index of  $10^{-5}$ , highly precise temperature sensors (202, 304) and pressure sensors (201) are not required. It is usually not necessary to take into account the relative humidity rF (203).

This means that the environmental sensors listed below are usually required:

- a pressure gauge (201) with an accuracy of approximately 1 hPa;
- an air thermometer (202) with an accuracy of slightly less than one degree;
- a material thermometer (304) with an accuracy that depends on the thermal expansion of the Fabry-Perot interferometer and should lie at approximately one degree if constructed from Zerodur.

Such sensors (201, 202, 304) are readily available on the market, inexpensive and reliable. The cost savings in comparison with a complete second Fabry-Perot interferometer as in the above-mentioned state of the art consequently are quite considerable.

If the current through the laser diode (1) migrates out of the predetermined control range over time (e.g., due to a change in the refractive index of the air), it can be brought back into this control range in the form of a change by an integral multiple of  $i_{FSR}$  and repeated locking. In such instances, N can either be determined completely anew or the change of N can be determined from the current change being carried out.

The following applies with respect to taking into account the aging of the laser diode (1): it manifests itself in an offset  $\lambda_A$  of the vacuum wavelength such that equation (1) becomes

$$\lambda_{v,A} = \lambda_{v,o} + \frac{d\lambda_v}{di}(i - i_o) + \frac{d\lambda_v}{dT_L}(T_L - T_{L,o}) + \lambda_A = \lambda_v + \lambda_A \quad (Gl\ 4)$$

It is possible to determine  $\lambda_{v,A}$  from the stabilization currently being carried out with equation (3) and equation (2);  $\lambda_v$  is obtained from equation (1). For example,  $\lambda_A$  can be determined before the arrangement is switched on and stored in the correction memory (410), with this value being used when the arrangement is subsequently switched on again. In this case, equation (4) is used instead of equation (1) when determining N and  $\lambda_L$ .

In the described embodiment, a laser diode (1) is used as the laser (1). According to one advantageous alternative, a Nd-YAG ring laser is used. This type of laser can be detuned by about  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  by changing the temperature control voltage. The control range is limited by sudden mode changes and approximately three-times as broad as the free spectral range of the above-mentioned Fabry-Perot interferometer (3).

Suitable Fabry-Perot interferometers (3) for the control circuit are described in the above-cited state of the art. A confocal design with Zerodur-glass ceramic carrier body and a sufficiently large bore for ensuring a free air exchange are particularly advantageous in this respect.

### Claims

1. Method for determining and fixing the atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) of a light source (1) with a stabilizing/control circuit (1, 3, 301, 305, 130) that has an ambiguity with certain sudden changes (FSR), characterized by the fact that a rough value of the atmospheric wavelength is determined from thermodynamic parameters ( $T_L$ ,  $p$ ,  $rF$ ) of the ambient air and, if so required, of parts (3) of the control circuits (1,3,301,305,130) in order to eliminate the ambiguity, wherein a number (N) of sudden changes (FSR) is determined from this rough value by means of rounding and the exact atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) is determined with this number (N) of sudden changes (FSR). 2. Fabry-Perot-stabilized laser light source for interferometers (2), with:

- a laser (1) with a frequency that can be tuned over a frequency range by means of at least one control parameter (i)

- a Fabry-Perot interferometer (3) with an air filling (320) that is in thermodynamic equilibrium with the volume (230) of the interferometer (2), has a free spectral range (FSR) that is smaller than the control range of the laser (1) and is provided with a photodetector (301) at its output

- a control circuit that fixes the atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) of the laser (1) to a transmission maximum (N) of the Fabry-Perot interferometer (3) by means of the photodetector (301) and the control parameters (i) of the laser (1) and, once the limits of the frequency range are reached, carries out a sudden change to an adjacent transmission maximum (N + 1, N - 1) over the free spectral range (FSR) of the Fabry-Perot interferometer (3)

- sensors and memories (450) for the atmospheric pressure (201) and temperature (202) in the volume (230) of the interferometer (2), for the control parameter(s) (i) and for the sum of the sudden changes between transmission maximums (N), and

- a computer (4) for

- calculating an approximate value of the atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) from the vacuum wavelength ( $\lambda_v$ ) that is determined by the control parameters (i) and from the refractive index that

is determined from the values of the atmospheric pressure ( $p$ ) and temperature ( $T_L$ ) in accordance with the Edlen parameter method,

- determining the order of the transmission maximum ( $N$ ) that lies closest to the approximate value, and
- determining the exact atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) from the order of the next closest transmission maximum ( $N$ ) and the known mode spacing of the Fabry-Perot interferometer (3).

3. Laser light source according to Claim 2, characterized by the fact that a laser diode with the control parameters diode current ( $i$ ) and diode temperature ( $T_L$ ) is used as the laser (1).

4. Laser light source according to Claim 2, characterized by the fact that a Nd-YAG ring laser with the control parameter temperature control voltage is used as the laser (1).

5. Laser light source according to Claim 2, characterized by the fact that the Fabry-Perot interferometer (3) has a confocal design.

6. Laser light source according to Claim 3, characterized by the fact that the diode temperature (101) is recorded, and by the fact that the control circuit (1, 3, 301, 305, 130) uses the diode current ( $i$ ) as the control parameter.

7. Laser light source according to Claim 2, characterized by the fact that sensors and memories for the body temperature (304,  $T_F$ ) of the Fabry-Perot interferometer (3) and/or for the temperature (101,  $T_{LD}$ ) of the laser (1) and/or for the relative humidity (203,  $rF$ ) in the volume (230) of the interferometer (2) are additionally provided and used in the computer (4) for calculating the approximate value of the atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ).

8. Method for calibrating a laser light source according to at least one of Claims 2-7, characterized by the fact that the measurements listed below are additionally carried out during the stabilized operation:

- two of the variables frequency of the laser (1), atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) of the laser light source, refractive index ( $n_L$ ) of the air in the interferometer volume (230), and
- the free spectral range (FSR) of the Fabry-Perot interferometer (3),
- wherein a function is determined therewith in the computer (4) and stored in order to calculate the atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ).

9. Method for switching on a laser light source that was previously switched off according to at least one of Claims 2-7, characterized by the fact that a value ( $\lambda_a$ ) for the aging-related shift in the frequency of the laser (1) which was stored at the time at which the laser light source was switched off is incorporated into the calculation of the approximate value of the atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ), namely by utilizing the same control parameters ( $i$ ).

10. Method for calibrating a laser light source according to Claim 8 for a length measurement interferometer (2), characterized by the fact that the atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) is determined by means of a length standard in the length measuring interferometer (2).

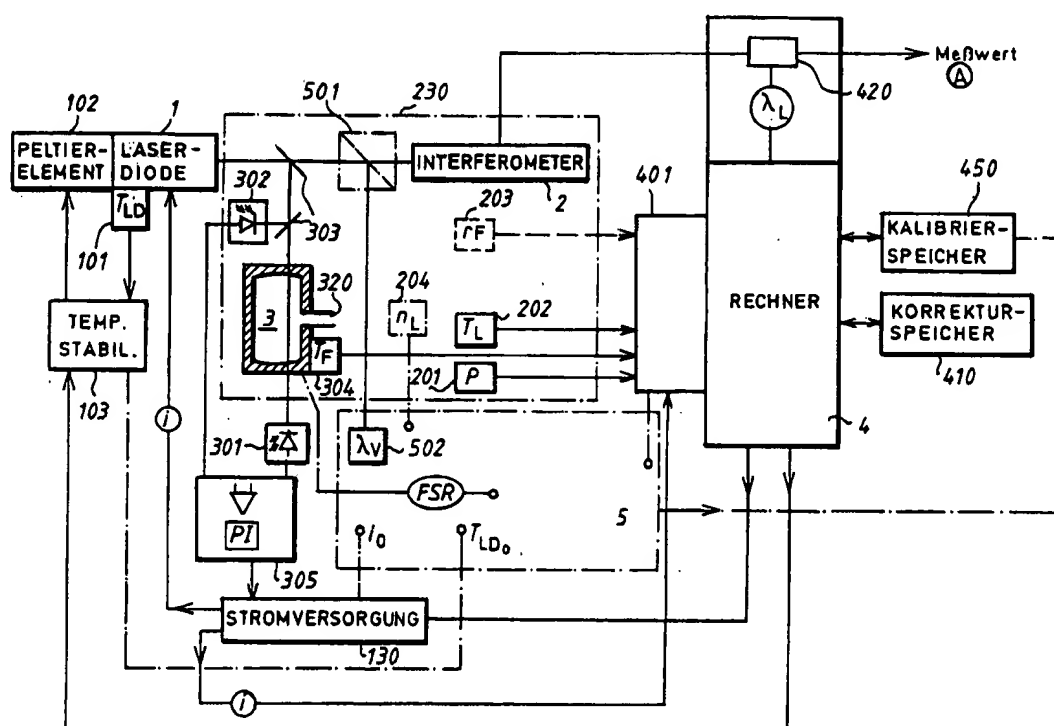


11. Method according to Claim 8, characterized by the fact that the refractive index of the air is determined from the atmospheric pressure ( $p$ ), the temperature ( $T_L$ ) and the relative humidity ( $rF$ ) in the interferometer volume (230) in accordance with the Edlen formula.

12. Method according to Claim 8, characterized by the fact that the refractive index of the air is measured with a refractometer.

13. Method for operating a Fabry-Perot-stabilized light source according to Claim 2, characterized by the fact that the determination of the exact atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) is repeated in the computer (4) within fixed time intervals.

14. Method for operating a Fabry-Perot-stabilized light source according to Claim 2, characterized by the fact that the determination of the exact atmospheric wavelength ( $\lambda_L$ ) is repeated in the computer (4) at predetermined changes in the signals of the sensors (201-204, i, 304).



Key:	A	Measuring value
	1	Laser diode
	2	Interferometer
	102	Peltier element
	450	Calibrating memory
	103	Temperature stabilization
	410	Correction memory
	130	Power supply